

**ПРИБОРЫ И ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ КОМПЛЕКСЫ,
ИЗГОТОВЛЕННЫЕ В ЛАБОРАТОРИЯХ**

УДК 546.05+546.07

**УСТАНОВКА ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ НАНОЧАСТИЦ
НЕОРГАНИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ МЕТОДОМ ЛАЗЕРНОЙ АБЛЯЦИИ
В ГАЗОВОЙ СРЕДЕ**

©2026 г. М. Л. Кусков, Н. Г. Березкина, А. Н. Жигач*

Поступила в редакцию 25.05.2026

После доработки 12.08.2026

Принята к публикации 24.08.2026

В научно-технической литературе описаны различные варианты лабораторных установок для лазерной абляции в газовых средах, построенные на базе устройства [1], например [2, 3]. Основными недостатками таких установок являются нормальное к поверхности мишени направление потока газа, сканирование мишени за счет ее вращения и перемещения, а также ограниченные возможности химических превращений материала мишени в процессе абляции.

Предлагаемая установка, для краткости называемая лазерная абляционная установка (ЛАУ), предназначена для получения наночастиц неорганических материалов, в том числе металлов, неметаллов, переходных элементов, соединений (оксидов, нитридов и др.). В качестве газовой среды в ЛАУ могут использоваться инертные (Ar, He) и реакционноспособные газы (в частности, воздух, N₂, O₂), водород, пары органических и элементоорганических соединений и т. п. ЛАУ позволяет проводить газофазную химическую модификацию получаемых наночастиц *in situ*, в том числе создавать тонкие модифицирующие поверхностные слои либо структуры ядро–оболочка (в зависимости от выбранного режима обработки).

ЛАУ смонтирована в двух независимых металлических каркасах размером 80×60×210 см³. В одном из них установлены блок питания ЛАУ, блок формирования лазерного излучения и управляющий компьютер. Во втором установлены консоль лазера со сканирующей головкой, испарительная камера, система управления газовыми потоками, система фильтрации и откачивающий насос. Принципиальная схема ЛАУ и ее газовая схема приведены на рис. 1 а, б.

Рис. 1. а – Принципиальная схема ЛАУ... **б** – газовая схема ЛАУ... **в** – вид на держатель образца с мишенью... **г** – приборная панель системы управления... **д** – внешний вид ЛАУ...

В ЛАУ используется волоконный наносекундный лазер Lab-100 Mod (ООО “Лазерби”, Россия) мощностью 100 Вт с высокоточной трехкоординатной системой позиционирования лазерного излучения. Лазер имеет следующие характеристики: длина волны излучения – 1 мкм, максимальная энергия одиночного импульса – 1 мДж, длительность одиночного импульса – 20–120 нс, частота следования импульсов – 100 кГц–1 МГц. Управление разверткой и параметрами лазерного излучения осуществляется управляющим компьютером при помощи программного обеспечения MaxiGraf (ООО “Лазерби”, Россия).

Испарительная камера изготовлена из дюралюминия, она представляет собой куб с длиной стороны 20 см с отверстиями доступа и съёмными фланцами. Отверстия диаметром 15 см обеспечивают легкий доступ внутрь камеры для замены мишени и чистки внутренней поверхности камеры. В верхнем съёмном фланце установлено окно из оптического кварца (оптическое окно) для ввода лазерного излучения в камеру. На боковом съёмном фланце (слева) установлены ввод газа-носителя со сменным соплом обдува (с круглым или плоским щелевым сечением [4, 5]) и быстросъёмный держатель мишени. На фронтальной стенке камеры установлено смотровое окно, изготовленное из термостойкого оптического стекла, для наблюдения за процессом абляции или для присоединения оптических приборов и датчиков.

Испаряемая мишень устанавливается в держатель таким образом, что поток газа направлен вдоль ее поверхности из сопла обдува в приемную (откачную) трубу, установленную на противоположной стенке камеры на вакуумно-плотном соединении (рис. 1а, в). Диаметр приемной трубы позволяет перекрывать большую часть абляционного факела – таким образом обеспечивается эффективный унос взвеси наночастиц в фильтры.

Мишень может быть вырезана в виде цилиндра (диска) из сплошного материала простого или сложного состава или выполнена в виде таблетки путем прессования однокомпонентного или многокомпонентного порошкового материала. Для синтеза нанопорошка химического соединения мишень может быть изготовлена из реакционноспособной смеси порошков исходных компонентов, взятых в заданном соотношении.

Регулирование параметров газовых потоков в линиях инертного и реакционноспособного газов осуществляется независимо с помощью двух регуляторов расхода газа (РРГ1, РРГ2) модели РРГ-10 (ООО “Элточприбор”, Россия), управляемых компьютером через модуль АЦП/ЦАП L-Card E14-140М (ООО “Л Кард”, Россия), и механического многооборотного вентиля РВ, дросселирующего поток через откачивающий мембранный насос НВМ-20 (рис. 1б).

Основной поток газа подается по линии K9-PPГ1-K2 в испарительную камеру. Регулятор PPГ1 является постоянным, он обеспечивает максимальный расход $2 \cdot 10^{-4}$ м³/с (по азоту). Реакционноспособный газ подается по линии K10-PPГ2-K8 в основной поток до его входа в испарительную камеру. Регулятор PPГ2 является сменным. В зависимости от требуемого режима химической обработки в линию могут быть установлены регуляторы с верхними пределами расхода $2 \cdot 10^{-4}$, 10^{-5} , 10^{-6} м³/с. В газовой схеме ЛАУ предусмотрена также возможность подачи реакционноспособного газа по отдельной линии через K1 в откачную трубу (ниже по потоку по отношению к абляционному факелу).

Заданные и фактические значения расхода газа через регуляторы (с пересчетом на тип газа) выводятся на компьютер и на цифровые четырехразрядные индикаторы на приборной панели системы управления газовыми потоками (рис. 1г). Измерение давления газа осуществляется датчиком ПД100И (ООО «ПО ОВЕН», Россия), сигнал с датчика давления выводится на компьютер и блок измерения и индикации 2TRM0 (ООО «ПО ОВЕН», Россия) на приборной панели. Система управления газовыми потоками позволяет устанавливать суммарный поток газа в диапазоне от 0 до $4 \cdot 10^{-4}$ м³/с при давлении в абляционной камере от 0 до 1.6 атм. В типичных режимах работы ЛАУ величина давления устанавливается в интервале 0.2–1.2 атм, а величина суммарного потока – в интервале $5 \cdot 10^{-5}$ – $2 \cdot 10^{-4}$ м³/с.

Внешний вид ЛАУ показан на рис. 1д. ЛАУ может работать при заданных настройках в автоматическом режиме. В случае отклонения фактических величин давления и расхода газов от установленных оператором значений более чем на 10%, а также при отключении лазерного излучения предусмотрено срабатывание светозвуковой системы оповещения.

ЛАУ позволяет получать в том числе наноразмерные порошки пирофорных материалов (прежде всего, металлов). Для таких случаев предусмотрена линия заключительной пассивации поверхности наночастиц медленным напуском атмосферного воздуха через ротаметр P1 перед разгрузкой фильтра. Для выгрузки пирофорного порошка без пассивации предусмотрена возможность наполнения фильтра инертным газом, его отсечения и снятия вместе с запирающими клапанами K12 и K13.

Полученные порошки исследованы методами РФА и ПЭМ. Кристаллические фазы идентифицировались по базе данных ICDD PDF-2. Средний размер наночастиц определялся по результатам измерения диаметров изображений частиц (в количестве не менее 3000 шт). На рис. 2 показаны ПЭМ-изображение наночастиц углерода и их распределение по размерам. Микроэлектронограмма на врезке в ПЭМ-изображение демонстрирует аморфное состояние полученных наночастиц. В табл. 1 приведены условия получения и характеристики наночастиц некоторых материалов.

Рис. 2. а –ПЭМ-изображение наночастиц углерода... **б** –распределение наночастиц по размерам

Таблица 1

Состав мишени	Газовая среда	Характеристика полученного продукта	
		Состав, кристаллическая фаза (%)	Средний размер частиц $\langle D \rangle$, нм
C	Ar	C (аморфный)	13.58
Mo	Ar	Mo (100%)	6.25
Zr	N ₂	ZrN (100%)	4.54
Zn	Ar + O ₂	Zn (82.9%) + ZnO (17.1%)	10.71
CuOx	Ar	Cu (60%) + Cu ₂ O (40%)	10.72

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена в рамках государственного задания ФИЦ ХФ РАН им. Н.Н. Семенова. Электронно-микроскопические исследования выполнены в ЦКП “Материаловедение и металлургия” НИТУ МИСИС.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Иванов М.Г., Котов Ю.А., Осипов В.В., Саматов О.М.* РФ Патент 2185931С1, 2002
2. *Осипов В.В., Платонов В.В., Уймин М.А., Подкин А.В.* ЖТФ. 2012. Т. 82. № 4. С. 117.
<https://elibrary.ru/item.asp?id=20325552>
3. *Осипов В.В., Платонов В.В., Шитов В.А., Максимов Р.Н.* Фотоника. 2017. № 7. С. 52.
<https://doi.org/10.22184/1993-7296.2017.67.7.52.70>
4. *Жигач А.Н., Кусков М.Л., Березкина Н.Г.* Устройство для получения наноразмерных порошков неорганических материалов. Заявка RU 2026114675, заявл. 13.05.2026
5. *Жигач А.Н., Кусков М.Л., Березкина Н.Г.* Устройство для получения наноразмерных порошков неорганических материалов. Заявка RU 2026114676, заявл. 13.05.2026

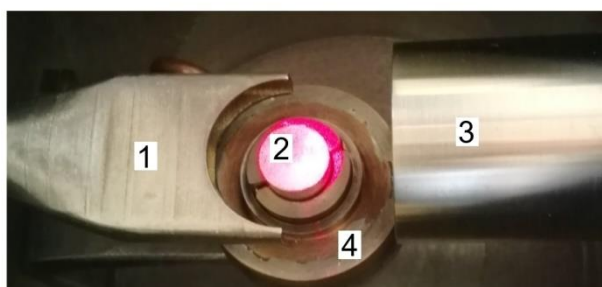
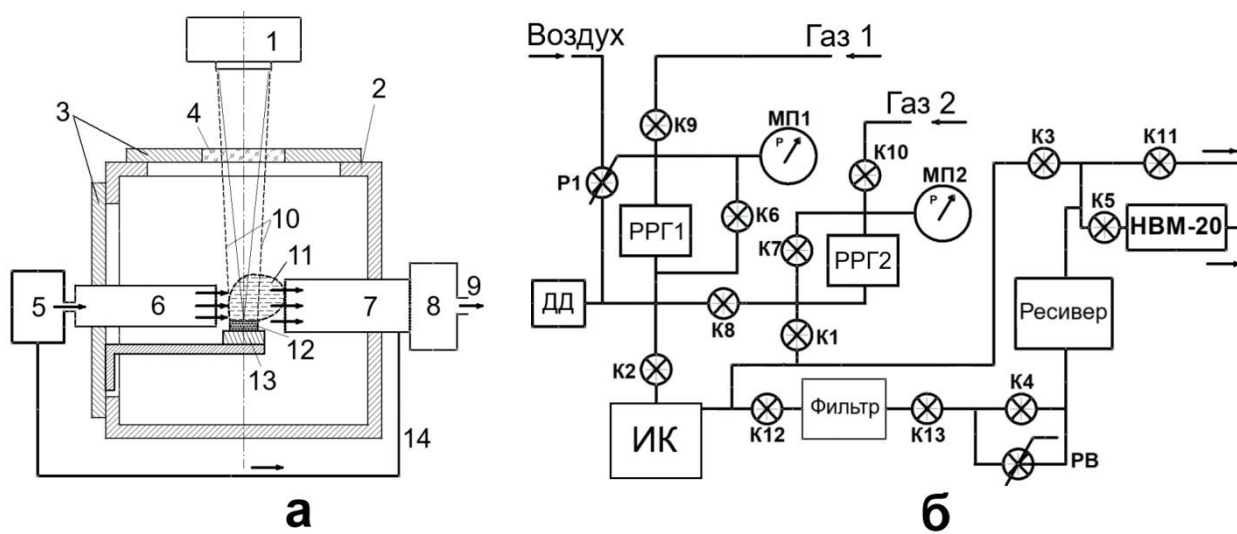
Адрес для справок: Россия, 119334, Москва, Ленинский просп., 38, корп.2. Институт энергетических проблем химической физики им. В.Л. Тальрозе Федерального исследовательского центра химической физики Российской академии наук. E-mail: yuleibe@yandex.ru

ПОДПИСИ К РИСУНКАМ

Рис. 1. а – Принципиальная схема ЛАУ: 1 – лазер, 2 – испарительная камера, 3 – съемные фланцы, 4 – оптическое окно, 5 – система подготовки газа, 6 – сопло обдува, 7 – приемная (откачная) труба, 8 – фильтры, 9 – выход на мембранный насос, 10 – диапазон перемещения лазерного луча, 11 – абляционный факел, 12 – мишень, 13 – держатель мишени, 14 – линия подачи газа-реагента. Стрелками показано направление движения газа. **б** – Газовая схема ЛАУ: ИК – испарительная камера, К1 – К13 – шаровые запорные краны, ДД – электронный датчик давления, МП1, МП2 – показывающие механические манометры, РВ – регулирующий многооборотный вентиль, РРГ1, РРГ2 – электронные регуляторы массового расхода газов, Р1 – ротаметр напуска воздуха, НВМ-20 – мембранный насос. Стрелками показано направление движения газа. **в** – Вид на держатель образца с мишенью: 1 – плоское целевое сопло обдува, 2 – мишень, 3 – приемная (откачная) труба, 4 – держатель мишени. **г** – Приборная панель системы управления газовыми потоками: 1 – манометры МП1 (слева), МП2 (справа), 2 – датчик давления в испарительной камере (условные единицы), 3 – индикаторы расхода газов ($\text{см}^3/\text{мин}$), в основном потоке (слева) и в линии подачи реагента (справа); верхний ряд – фактические значения, нижний – заданные, 4 – таймер работы лазера. **д** – Внешний вид ЛАУ

Рис. 2. а – ПЭМ-изображение наночастиц углерода, на врезке показана микроэлектроннограмма; **б** – распределение наночастиц по размерам.

Рис. 1.



в



г



д

Рис. 2.

